

円環振動子を用いた多自由度回転・リニア超音波モータの検討

著者	盧 波, 青柳 学, 田村 英樹, 高野 剛浩
雑誌名	日本ロボット学会学術講演会予稿集
巻	29
ページ	RSJ2011AC3K1-2(1)-RSJ2011AC3K1-2(4)
発行年	2011-09
URL	http://hdl.handle.net/10258/1647

円環振動子を用いた多自由度回転・リニア超音波モータの検討

著者	盧 波, 青柳 学, 田村 英樹, 高野 剛浩
雑誌名	日本ロボット学会学術講演会予稿集
巻	29
ページ	RSJ2011AC3K1-2(1)-RSJ2011AC3K1-2(4)
発行年	2011-09
URL	http://hdl.handle.net/10258/1647

円環振動子を用いた多自由度回転・リニア超音波モータの検討

○盧 波，青柳 学（室工大），田村 英樹，高野 剛浩（東北工大）

1. はじめに

近年の宇宙開発の進展に伴い、宇宙探査ロボット・惑星探査ローバのような宇宙特殊環境下で稼働する宇宙機の開発が行われている。宇宙環境では微小重力、高真空($1 \times 10^{-8} \text{Pa}$)、高放射線、温度変化($-150^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$)などの要素が存在する、極限環境であるため、その影響を受けにくいアクチュエータが望まれている。

多自由度 (MDOF) アクチュエータの中でも球面超音波モータ(SUSM)は、以下の特徴[1]-[3]を有するため、理想的な多自由度駆動源として宇宙環境に適していると考えられる：

- 1) 低速時に高トルク特性を有するため減速器が不要であり、シンプルな構造でモータシステムの小型・軽量化が実現できる。
- 2) 直接駆動ができ、自己保持特性を有し停止時に通電が不要である。
- 3) 潤滑油の必要としないので、高真空の環境に適する。
- 4) 高放射線などの環境に影響しない。
- 5) 電磁ノイズを発生しないため、無線通信に影響を与えない。
- 6) 制御性に優れ、モータの高精度化制御が実現できる。

筆者らは多重モード円環振動子を用いて、球状ロータを任意軸に回転するMDOF-SUSMを開発している[4]-[7]。球状ロータは単一の円環振動子に嵌入され、ステータ振動子の表面に貼り付けたPZT板により励振された多重モードの組み合わせによって、3軸の自由回転が可能になる。また、球面超音波モータに用いられた円環形振動子は振動モードの設計により、リニア超音波モータも構成可能である。円環形振動子の内径にねじを切らずにスライダを直接に直動・回転させるリニア超音波モータも考案した[8]。

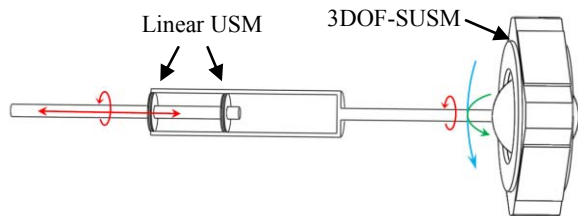


図1 直動型多自由度マニピュレータの構造図

本研究で考案した多自由度回転・リニア超音波モータを利用し、図1に示すような直動型多自由度マニピュレータも考案できる。球座標系の動作ができ狭い空間での多自由度動作が期待できる。本報告で

は考案した円環形多自由度SUSMと多自由度リニアUSMの構造・原理・試作および実験結果について報告する。

2. 円環形球面超音波モータ

2.1 モータの基本構造

図2に本研究で提案した球面超音波モータの基本構成を示す。単一のステータ振動子に球状ロータを嵌入する構造は、従来のサンドウィッチ型構成で用いた2つのステータ振動子で球状ロータを内包するように一体化したものとみなせる[7]。球状ロータは単一の円環振動子に嵌入し、ステータ振動子の各表面に貼り付けたPZT板を励振することによって、任意軸方向に回転ができる。

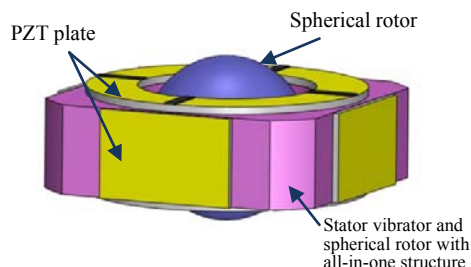


図2 円環形球面超音波モータの基本構造

2.2 動作原理

モータのステータ振動子と球状ロータは球面ベアリングと同様の製作方法で一体構造を実現できる。モータの構造が簡単、妨害振動などの影響が少ない特徴を有する。円環振動子は上下および側面に計6枚のPZT板を貼り付け、径方向伸縮振動モード[R1-mode, 図3(a)], 屈曲振動モード[B₁₁-mode, B₁₁'-mode, 図3(b)], 非軸対称振動モード[(1,1)-mode, ((1,1))'-mode, 図3(c)]の3種類の振動、5つの振動モードが励振可能である。モータの上下表面に貼り付けた2枚の円環形PZT板は屈曲振動モード励振用であり、側面の4枚のPZT板は径方向伸縮振動モードと非軸対称振動モード励振用である。

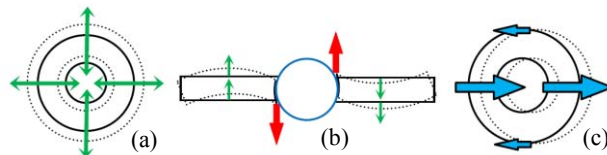


図3 励振可能な3種類の振動モード

以下に振動モードの組み合わせ方法を述べる：

A. 図4(a)に示す、駆動周波数 f_1 、X(Y)軸回転する場合：

- X(Y)軸回転に、振動子は同一の周波数における2種類の振動モードを励振することが可能であ

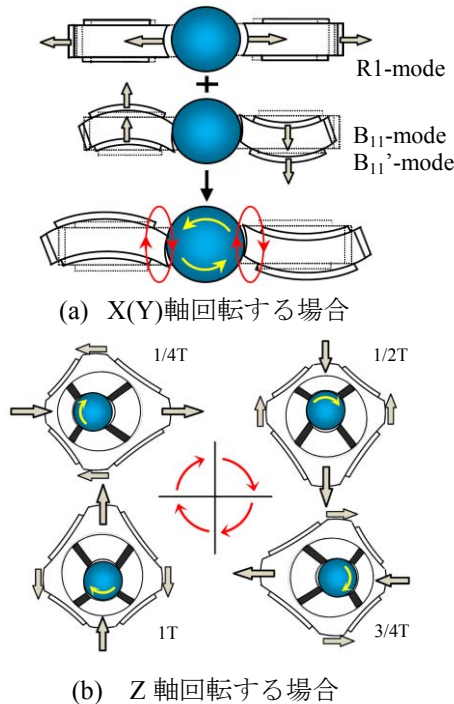


図 4 球面超音波モータの動作原理

る。振動子上下表面に貼り付けた PZT 板により B_{11} -mode と B_{11}' -mode が励振される。 B_{11}' -mode は B_{11} -mode と同形の直交縮退モードである。

- 振動子側面の 4 枚の PZT 板あるいは振動子上下表面に貼り付けた PZT 板により, R1-mode が励振される。
- R1-mode と B_{11} -mode の組み合わせにより X 軸方向回転が実現できる。
- R1-mode と B_{11}' -mode の組み合わせにより Y 軸方向回転が実現できる。

B. 図 4(b)に示す, 駆動周波数 f_2 , Z 軸回転する場合:

- 振動子外側の 4 枚の PZT 板あるいは振動子上下表面に貼り付けた PZT 板により, $((1,1))$ -mode と $((1,1))'$ -mode が励振される。二つ振動モードを組み合わせることによってモード回転が生じ, 球状ロータとステータ振動子の球面接触面に楕円運動が生成され, 球状ロータの Z 軸方向回転が可能になる。

2.3 モータの試作

本研究では, 多自由度球面超音波モータの部品点数を極限まで減少し, 構造の単純化により単一デバイス化を実現する。単一のステータ振動子に球状ロータを嵌入する構造は, ロッドエンドに用いられる球面軸受の製作方法により実現できる。構造と形状寸法を図 5 に示す, ステータ振動子を二つの部分に分けて製作し, その後一体化する。まず, 振動子のインナーレース部分は球状ロータを包み込んでスウェッジ加工を施した後, 予定の寸法にレースの外径と端面を切削する。次に加工した球状ロータとレース全体をハウジングに挿入し, 余分な部分を取り除

く。この方法でモータの一体化構造を実現する。
考案した構造の SUSM の回転原理を確認するため, まず, Z 軸回転のみ可能な振動子を試作した。Z 軸は $((1,1))$ -mode と $((1,1))'$ -mode を利用するため, 周波数設計が容易である。今回は Z 軸方向の回転だけが検討するため, 試作したモータは設計した寸法ではなく, ステータ振動子は Fig.6 に示すように上下表面に 2 枚だけの PZT 円板を貼り付けた単純な円環形構造である。

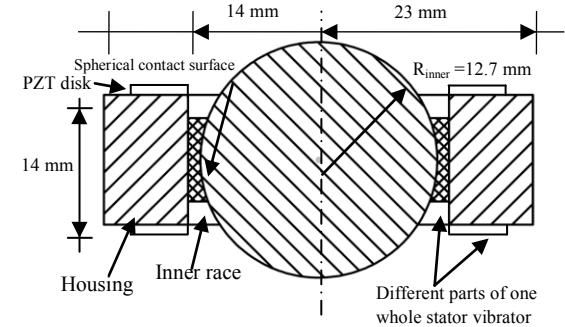


図 5 球面モータの構造および形状寸法

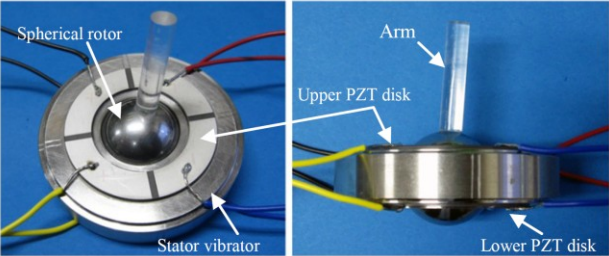


図6 試作した球面超音波モータ

2.4 実験結果

試作したSUSMのステータ振動子のアドミタンス特性の測定結果を図7に示す。Z軸回転に用いる非軸対称振動モード $((1,1))$ -mode, $((1,1))'$ -mode のアドミタンス特性のみが測定されている。共振周波数は 49.93 kHz であり, 設計に用いた有限要素法解析結果と同様の結果が得られた。

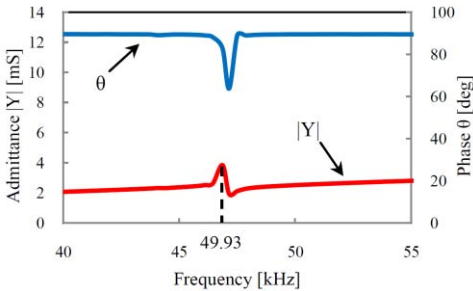


図 7 試作した SUSM のアドミタンス特性

ステータ振動子の上下表面に貼り付けられた 2 枚の PZT 円板の 4 分割された各駆動電極を用いて励振および位相の切り替えを行った。駆動周波数が 46.93kHz の時球面モータの二相駆動による球状ロータの双方向回転が実現できた。

Fig.8に $((1,1))$ -mode の印加電圧に対する, モータの最大トルクの測定結果を示す。Z 軸回転の最大トル

クは印加電圧の増加に伴って増加することが分かった．印加電圧は190[Vp-p]の時，最大トルクは約15[mNm]であった．

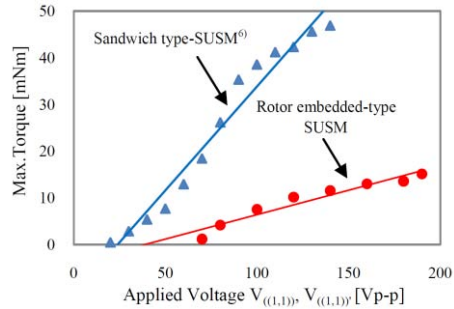


図8 モータZ軸回転の最大トルク

本提案の SUSM は Z 軸回転する場合，振動子の有効振動部分の単位重量あたりのトルクはサンドイッチ型 MDOF-SUSM[6]より小さかった．その要因として以下の要素があげられる：

- 今回の実験品は初の試作品であり，一体化構造でロータの予圧調整が非常に難しい．モータの試作方法の検討は今後も継続して検討していく課題である．今回の試作品はステータ振動子と球状ロータ予圧が小さいため，大きなトルクが得られなかったと考えられる．
- 図 5 に示すステータ振動子の材料はすべて SUS403 であり，重量の増加によってモータの単位重量あたりトルクは小さくなった．図 5 のハウジング部分の材料を軽いアルミ合金を利用してモータを製作する必要がある．

3. 円環振動子を用いた回転・リニア超音波モータ

3.1 ステータ振動子の構成

Fig.9(a)に回転リニア超音波モータ[8]の構造を示す．PZT板 (C213, 厚み0.2 mm)の電極は2分割され，互いに逆向きの分極方向である．図9(b)に示すように振動板(SUS304, 厚み0.2mm)に対して同一の分極方向となるように振動板の両面に接着されている．片持ちばり構成の支持部が円環の外径の2 か所に設けられている．

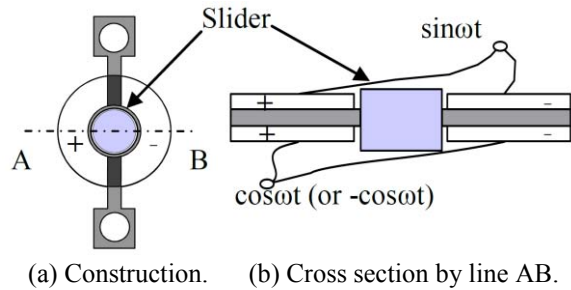


図 9 リニア超音波モータの構造

3.2 回転リニア USM の動作原理

リニア超音波モータ(Type-A)の円環内径とスライダ間の圧接力を制御するために，図 10(a)に示す((1,1))-modeを使用し，さらに厚み(z 軸)方向の推力発生のために図 10(b)に示す面垂直屈曲振動(B₂₁-mode)

を使用する．各モードの共振周波数は近接され，縮退している．図 10(c)に示すように B₂₁-mode の変位は((1,1))-mode と直径 A-B 上で変位が直交しているため，90°の時間位相差を与えて駆動すると，楕円軌跡が形成される．スライダを接触させると点 1, 2 から同じ方向に力を受け移動する．電極を 4 分割にした場合回転動作が可能である．したがって，回転と直動動作を有する多自由度 USM が可能である．試作結果より，動作を確認した．また，Fig.11(a)に示すような B₂₁-mode と，図 11(b)に示す径方向伸縮振動(R₁-mode)を組み合わせる構成モータ(Type-B)も可能である[1]．

4. まとめ

本研究で考案した MDOF-SUSM では，単純な構造でモータの単一デバイス化を実現した．現段階では，回転原理の確認のため Z 軸回転が可能な SUSM の試作を行い，モータの動作原理を確認した．また，Z 軸双方向の回転を実現し，回転特性を明らかにした．SUSM に用いた円環形振動子の振動モードを変えることで直動・回転できるリニア超音波モータも実現した．

今後，MDOF-SUSM の試作方法をさらに検討し，モータの性能の向上を図る．また，高真空および高温・低温環境でモータの摩擦特性・耐久性・トルクなどの性能について検討する．

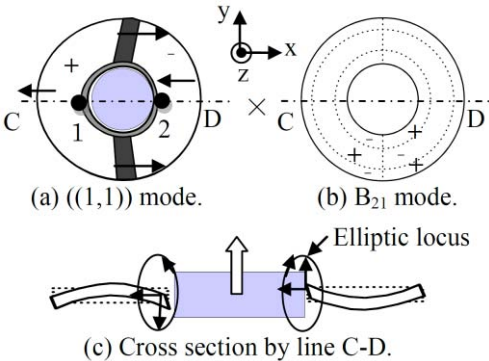


図 10 リニア超音波モータ (Type-A) の動作原理

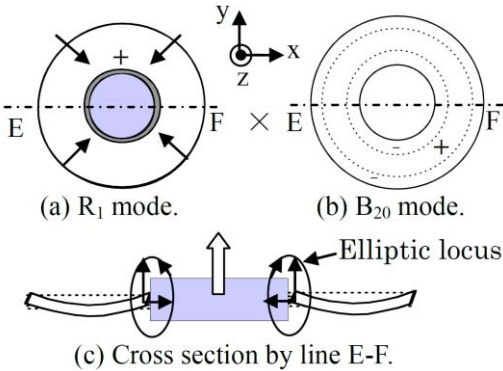


図 11 リニア超音波モータ (Type-B) の動作原理

謝 辞

本研究の一部は高橋産業経済研究財団の研究助成によるものである．また，球面軸受の製作にご協力頂

きましたミネベア株式会社藤野氏および篠原氏に感謝申し上げます。

参 考 文 献

- [1] S. Ueha and Y. Tomikawa, Ultrasonic Motors Theory and Applications, OXFORD SCIENCE PUBLICATIONS, (1993) p.6-29.
- [2] 矢野智昭: “宇宙用球面モータ”, 第 28 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, J2010AC1N2-3, 2010.
- [3] P.Janker, F.Claeyssen: “New Actuators for Aircraft and Space Applications”, 10th Int. Conf. New Actuators, Bremen, Germany, pp.324-330, 2006.
- [4] M. Aoyagi, S. P. Beeby, and N. M. White: “A novel multi-degree-of-freedom thick-film ultrasonic motor,” IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control 49, no.2, pp.151-158, 2002.
- [5] M. Aoyagi, T. Nakajima, Y. Tomikawa, and T. Takano: “Examination of disk-type multidegree-of-freedom ultrasonic motor,” Jpn. J. Appl. Phys., Vol.43, pp.2884-2890, 2004.
- [6] B. Lu, M. Aoyagi, T. Takano, and H. Tamura: “Examination of Sandwich-Type Multidegree-of-Freedom Spherical Ultrasonic Motor,” Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 49, No. 7, pp. 07HE24-1-7, 2010.
- [7] 盧波, 青柳学, 田村英樹, 高野剛浩: “嵌入型円環状多自由度球面超音波モータの開発”, 日本機械学会 2011 年ロボティクス・メカトロニクス講演会, pp. 1A2- F08, 2011.
- [8] 蒔田竜子, 青柳学, 高野剛浩, 田村英樹: “円環形振動子を利用した厚み方向超音波リニアモータの検討”, 日本音響学会 2010 年春季研究発表会講演論文集, pp.1393-1394, 2010.